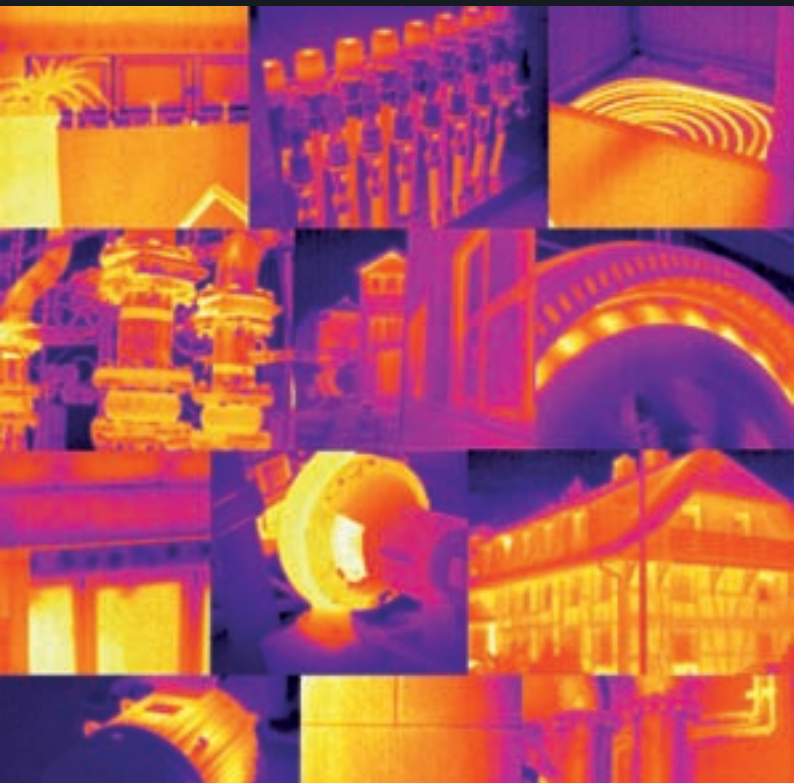
Committing to the future

サーモグラフィ
ポケットガイド



著作権（版権）、保証、責任について

このポケットガイドに記載されている情報は、著作権（版権）によって保護されています。すべての権利は、Testo AG 社が独占的に保有します。内容および図版は、Testo AG 社から書面による承諾を事前に受けることなく、商業的な複製、改変ならびにユーザーの規定の目的以外の使用を行ってはなりません。
このポケットガイドの内容は、間違い等のないよう、慎重に作成されています。ただし、これらの情報は不変のものではなく、Testo AG 社は、変更および追加を行う権利を保有します。したがって Testo AG 社は、提供されている情報の正確性と完全性についての保証は一切提供いたしません。法的責任は、その法的根拠がいかなるものであれ、Testo AG 社ならびに関連する代理店および下請け業者が故意、重大な過失、重大な契約義務違反、または軽度の過失によって発生させた損害のみを対象とします。軽度の過失の場合、Testo AG 社の法的義務の範囲は、同種の似通った取引において典型的に見られ、予期することが可能な損害に限定されます。このことは、保証または製造物責任法を根拠とする請求権には当てはまりません。

Testo AG
2009 年 9 月

ごあいさつ

お客様各位

「百聞は一見にしかず」という言葉があります。

エネルギー価格が上昇し、機械のダウンタイムがコストの上昇につながる現在、非接触式温度測定技術は、建築物の性能評価と工業メンテナンスの分野で重要な役割を果たしています。しかしながら、サーモグラフィは奥の深い技術であり、非接触式温度測定を実施する際には、守るべき重要な基本原則があります。
この小冊子『サーモグラフィポケットガイド』は、お客様から日々寄せられる質問に基づいて制作されています。実践的な測定事例におけるヒントやノウハウをはじめ、数多くの興味深い情報や役に立つ実用的な情報を掲載しておりますので、皆様の日々の業務にご活用頂ければ幸いです。

Daniel Auer（ダニエル・アウエール）
Manager Product Group Infrared Measurement
（赤外線測定製品グループ マネージャー）

目 次

1	サーモグラフィの理論	5
1.1	放射、反射、透過	6
1.2	測定範囲と測定距離	13
2	サーモグラフィの使用	16
2.1	測定物体と測定環境	16
2.2	放射率（ε）と反射温度の特定	25
2.3	サーモグラフィ装置による温度測定の誤差の発生源	28
2.4	サーモグラフィ装置による温度測定に最適な条件	34
2.5	完全な熱画像	35
3	付録	38
3.1	サーモグラフィ用語集	38
3.2	放射率表	48
3.3	テストーからのご案内	50

1　サーモグラフィの理論

温度が絶対零度（0 ケルビン= -273.15 ℃）よりも高いすべての物体は、赤外線を放射します。人は、この赤外線を肉眼で見ることはできません。

1900 年に物理学者マックス・プランクが示したとおり、人の体温と、人体から放出される赤外線の放射強度の間には、相関性があります。
サーモグラフィ装置は、撮像範囲内で感知される遠赤外線の強度を測定し、これに基づいて測定対象物の見かけの温度を計算します。この計算には、物体表面の放射率（ε）と反射温度という 2 つの変数が使われ、サーモグラフィ装置では、これらの値を適切に設定する必要があります。
サーモグラフィ装置のセンサは、多数の検出素子（testo 875/881 では、横 160 × 縦 120 の 19,200 個の素子）から構成されています。検出素子の 1 つ 1 つは個別の温度測定スポットに対応し、ディスプレイ上で温度を示すカラー画像として表示されます（P.13「測定範囲と測定距離」参照）。

サーモグラフィ（サーモグラフィ装置による温度分布測定）は、非接触のパッシブ測定です。サーモグラフィで得た画像（熱画像）は、物体表面の（見かけの）温度分布を示します。このため、サーモグラフィ装置では、物体の内部や向こう側の温度分布を知ることはできません。

1.1 放射、反射、透過

サーモグラフィ装置が記録する赤外線には、撮像範囲内にある物体からの放射赤外線と、反射赤外線、ならびに透過赤外線が含まれます。

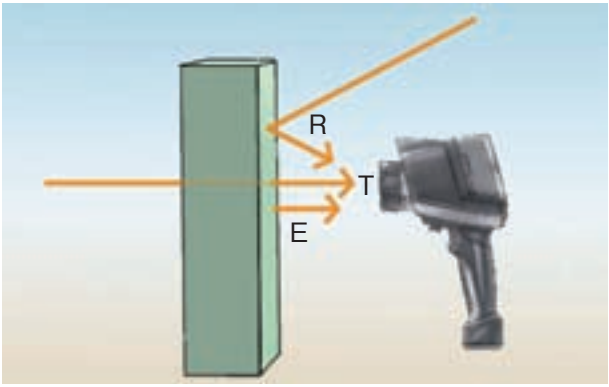


図 1.1：放射（E）、反射（R）、透過（T）

放射率（ε）

放射率（ε）は、物体が赤外線を放射する能力を示します。

- 放射率 ε は、材質や表面の特性によって変化し、一部の材料では温度によっても変化します。
- 放射率の最大値は、ε = 1（100%）です（P.40「黒体」参照）。ただし ε は、実際には決して 1 に達することはありません。

- 実際の物体では、$\varepsilon < 1$ になります。これは、実際の物体は必ず赤外線を反射し、場合によっては背後からの赤外線も透過するからです。
- 非金属の多く（例：PVC、コンクリート、有機物質）は遠赤外線に対して高い放射率（$\varepsilon \fallingdotseq 0.8 \sim 0.95$）を示し、放射率は温度に依存しません。
- 金属は放射率が低く、温度によって変動します。この傾向は、表面に光沢のある金属の場合に特に強くなります。
- 放射率 ε は、サーモグラフィ装置にマニュアル操作で設定できます。

反射率（ρ）

反射率（ρ）は、物体が赤外線を反射する能力を示します。

- 反射率 ρ は、表面の特性、温度および材質によって変化します。
- 一般的に、滑らかで光沢のある表面は、ざらつきや凹凸があって光沢のない表面よりも反射量が多くなります。
- 反射赤外線による温度（反射温度）は、サーモグラフィ装置にマニュアル操作で設定できます。
- 多くの測定アプリケーションにおいて、反射温度は、周辺温度と一致します。周辺温度は、例えば testo 610 温湿度計などを使って測定することができます。
- 反射温度は、ランバート面を使って特定できます （P.27「(簡易) ランバート面による反射温度の測定」参照）。
- 反射される赤外線の反射角は、つねに入射角と同じです （P.31「鏡面反射」参照）。

透過率（τ）

透過率（τ）は、物体が赤外線を透過する能力を示します。

- 透過率 τ は、材質の種類と厚みに影響されます。
- 大部分の材質は、遠赤外線を透過しません。

キルヒホッフの法則

サーモグラフィ装置が記録する赤外線には、以下が含まれます。

- 測定対象物から放射される赤外線（P.6 の図 1.1 の E）
- 測定対象物が反射する周辺からの赤外線（P.6 の図 1.1 の R）
- 測定対象物の裏側から透過する赤外線（P.6 の図 1.1 の T）

これらの構成比率を合計すると、以下の式で表されるように、全体量 1（100%）になります。

$$\varepsilon + \rho + \tau = 1$$

実際には、透過分が影響するケースはまれなため、上式の透過率 τ は無視され、以下のように簡略化できます。

$$\varepsilon + \rho = 1$$

その結果、サーモグラフィにおいては次のことが言えます。

放射率が低いほど

⇨ 反射赤外線の割合が高くなり、

⇨ 正確な温度測定を実施するのが困難になるとともに、

⇨ 反射温度を正しい値に設定することが重要になります。

放射と反射の関係（ρ ＝1 - ε）

1. 放射率の高い（$\varepsilon \geq 0.8$）物体の測定：
   - ⇨ 反射率（ρ）は、低い値になります。
   - ⇨ したがって、サーモグラフィ装置による温度測定は、非常に簡単に実行できます。

2. 放射率が平均的な値（$0.6 < \varepsilon < 0.8$）の物体の測定：
   - ⇨ 反射率（ρ）は、平均的な値になります。
   - ⇨ したがって、サーモグラフィ装置による温度測定は、簡単に実行できます。

3. 放射率の低い（$\varepsilon \leq 0.6$）物体の測定：
   - ⇨ 反射率（ρ）は、高い値になります。
   - ⇨ サーモグラフィ装置による温度測定は可能ですが、結果は慎重に検証する必要があります。
   - ⇨ 反射温度を正しい値に設定することが必須となります。反射温度補正（RTC）は、温度計算の際に重要な役割を果たします。

測定対象物の温度と周辺温度との差が大きいときには、特に放射率を正しく設定することが重要になります。

1. 測定対象物の温度が周辺温度よりも高い場合(P.11 の図 1.2 の室内ヒーター):
   ⇨ 放射率を高く設定すると、温度の読み取り値が低くなりすぎます（図のサーモグラフィ装置 2)。
   ⇨ 放射率を低く設定しすぎると、温度の読み取り値が高くなりすぎます（図のサーモグラフィ装置 1)。

2. 測定対象物の温度が周辺温度よりも低い場合(P.11 の図 1.2 のドア):
   ⇨ 放射率を高く設定すると、温度の読み取り値が高くなりすぎます（図のサーモグラフィ装置 2)。
   ⇨ 放射率を低く設定しすぎると、温度の読み取り値が低くなりすぎます（図のサーモグラフィ装置 1)。

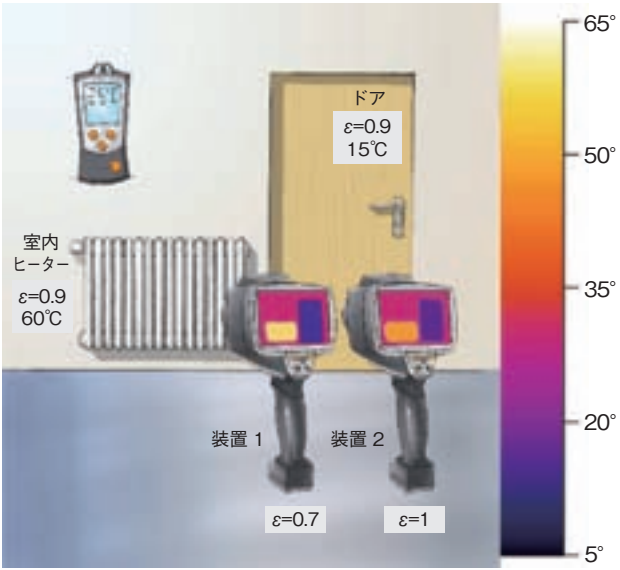


図 1.2：不正確な放射率設定による温度測定への影響

注意：

測定対象物の温度と周辺温度との差が大きいほど、また放射率が低いほど、測定誤差は大きくなります。放射率の設定が不適切な場合、誤差は増大します。

- サーモグラフィ装置では、物体の表面温度以外は測定できません。物体の内部温度や、背後にあるものの温度は測定できません。
- ガラスに代表される多くの材質は、見た目は透明ですが、遠赤外線は通しません（P.30「ガラスの測定」参照）。
- 測定物に覆い（カバー）がある場合には、必要に応じて取り除いてください。取り除かなければ、覆い（カバー）の表面温度を測定することになります。

  注意：

  測定対象物となる装置や機器の取扱説明書/操作説明書の指示内容には、つねに従ってください。
- 透過性のある材質はまれですが、薄いプラスチックシートや、テストー製サーモグラフィ装置のレンズとレンズプロテクタの材質であるゲルマニウムには透過性があります。
- 測定対象物の表面の温度分布に対して、裏側（内側）にある物体から熱伝導の影響がある場合には、裏側（内側）にある物体の形状が熱画像で確認できることがあります。ただしその場合も、サーモグラフィ装置は表面温度を測定しているだけに過ぎません。裏側（内側）にある物体の温度は、サーモグラフィ装置で正確に測定することはできません。

1.2 測定範囲と測定距離

適切な測定距離と測定可能な物体の大きさを特定するためには、以下の 3 つの要素を考慮する必要があります。

- 視野角（FOV）
- 最小検知寸法（IFOVgeo）
- 測定対象物の最小直径（IFOVmeas）

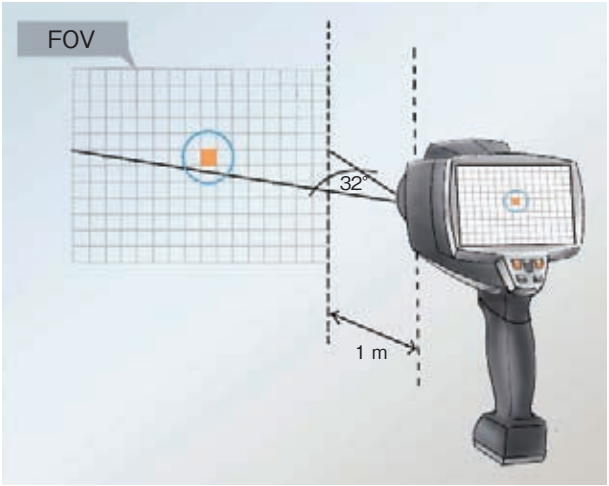


図 1.3：サーモグラフィ装置の視野角

サーモグラフィ装置の視野角（FOV）は、サーモグラフィ装置を通して見ることのできる範囲を決定します（P.13 の図 1.3）。視野角は、使用するレンズによって決まります（例：testo 875/881 の 32° 標準レンズや、オプションの 9° 望遠レンズ）。

視野角を大きくしたい場合は、広角系の標準レンズを使用する必要があります。

さらに、サーモグラフィ装置の空間分解能も確認しておく必要があります。この値と測定距離から、最小検知寸法（IFOVgeo：1 画素当たりの大きさ）が決まります。

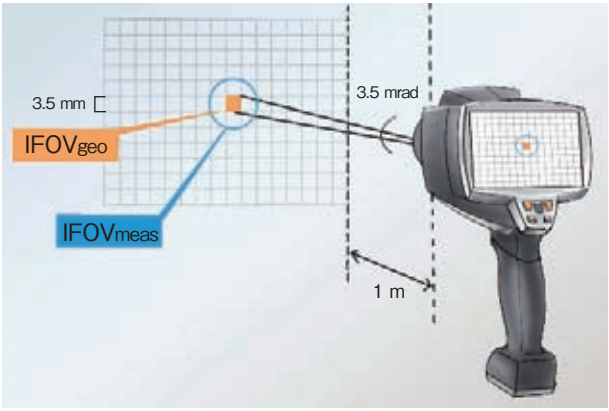


図 1.4：空間分解能（1 画素の視野角）と最小検知寸法（IFOVgeo）

レンズの空間分解能が 3.5 mrad で測定距離が 1 m の場合、最小検知寸法（IFOVgeo）は 3.5 mm 角となり、これがディスプレイ内で 1 つの画素として表示されます(P.14 の図 1.4)。正確な温度測定結果を得るためには、測定対象物の大きさは、最小検知寸法（IFOVgeo）の 2～3 倍以上でなければなりません。
したがって、測定対象物の最小直径（IFOVmeas）としては、以下の式で計算される値が目安として使われます。
IFOVmeas ≒ 3 x IFOVgeo

- 空間分解能を高めるためには、望遠レンズを使用する必要があります。
- 当社では、測定距離から FOV 値、IFOVmeas 値、IFOVgeo 値を計算する円盤型 FOV 早見チャートをご提供しています。この無料の早見チャートをご希望の方は、http://www.testo.jp/contact/index.html からお申し込みください。

2　サーモグラフィの使用

2.1 測定物体と測定環境

測定物体

1. 材質と放射率

各種の材質には、固有の放射率があります。これに基づいて、物体表面から放射される赤外線量と反射する赤外線量を求めることができます。

2. 色

対象物の色は、サーモグラフィ装置による温度測定に使われる遠赤外線の量には、ほとんど影響しません。

暗い色の表面は、明るい色の表面と比べて近赤外線をより多く吸収するため、温度の上昇速度が速くなります。しかし、放射される赤外線の量は物体の色ではなく、あくまでも表面温度に依存します。例えば、黒く塗装されたヒーターと白く塗装されたヒーターが互いに同じ温度である場合、両者はまったく同じ量の遠赤外線を放射します。

3. 測定対象物の表面

測定対象物の表面特性は、サーモグラフィ装置による温度測定に大きく影響します。例えば、表面の構造や濡れ、汚れといった条件によって、表面の放射率は変化します。

表面の構造

同じ材質であっても、なめらかさや光沢や反射性のある表面は、一般的に、つや消し、粗さ、引っ掻き傷などがある表面よりも放射率がわずかに低くなります。非常になめらかな表面には、多くの場合、鏡面反射が発生します（P.31「鏡面反射」参照）。

表面の濡れ、着雪、霜

水、雪、霜は放射率が比較的高い（約 $0.85 < \varepsilon < 0.96$）ため、一般的に、これらの物質自体を測定対象とすることに問題はありません。しかし、温度を測定したい他の物体の表面にこれらの自然現象による皮膜が形成された場合は、物体の温度測定の結果に影響します。水は、蒸発するときに表面を冷やす効果があり、雪にはかなりの断熱効果があります。通常、霜は面を完全に封鎖しないので、測定結果には、霜そのものと、その下にある物体表面の放射率を考慮しなければなりません。

表面上の汚れと異物

埃、すす、潤滑油などが物体の表面に付着すると、一般的に表面の放射率は上昇します。このため、一般的に、汚れた物体を測定対象とすることに問題はありません。しかし、サーモグラフィ装置はつねに表面の温度を測定することから、実際には汚れの表面温度が測定されることになり、汚れの下にある物体の温度を正確に測定していることにはなりません。

- 物体の放射率は、その表面構造に大きく影響されます。
- 測定物の表面が別の物体で覆われている場合は、覆っている物の種類に応じて適切な放射率を設定しなければなりません。
- 濡れた表面や、雪、霜などに覆われた表面の測定は避けてください（表面の正確な温度を測定できません）。
- 埃が（わた状の）空気を含んだ状態で付着している場合、そのまま測定するのは避けてください（わた埃に含まれる空気によって精度が落ちます）。
- なめらかな表面を測定するときには、近くに熱放射源（例：太陽、ヒーターなど）がないかどうか注意してください。

測定環境

1. 周辺温度

サーモグラフィ装置で物体の表面温度を正確に計算するためには、放射率（ε）に加えて、反射温度の設定にも注意する必要があります。多くの測定アプリケーションにおいて、反射温度は、周辺温度に一致します（P.19「放射」参照）。周辺温度は、testo 610 温湿度計などを使って測定することができます。

測定対象物の温度と周辺温度の差が大きい場合は、放射率を正しい値に設定することが特に重要です（P.11 の図 1.2）。

2. 放射

温度が絶対零度（0 ケルビン= -273.15 ℃）よりも高いすべての物体は、赤外線を放射します。測定対象との温度差の大きい物体が近くにある場合は、そこからの放射によって、サーモグラフィ装置を使った温度測定の精度に影響が出る場合があります。こうした干渉要因は、可能な限り避けるか、影響が出ないように措置を講じてください。干渉要因は、例えば布や段ボールなどで覆えば、測定精度の低下を抑えることができます。干渉要因の影響を除外できない場合には、反射温度は周辺温度と一致しません。測定対象物の表面で反射する赤外線の量を測定するには、黒球温度計やランバート面（P27.「反射温度の特定」参照）を使用することを推奨します。

屋外でのサーモグラフィ測定の注意点

快晴（青空）の日の赤外線は上空で拡散放射されます。快晴の場合、日中、太陽（約 5500 ℃（K））と空（約 -50～-60 ℃）が物体表面に写りこむ可能性があります。しかしながら、空の写りこみ面積は太陽の写りこみ面積と比べて非常に大きいため、このような日に屋外でサーモグラフィ測定すると、放射率の低い物体（例：光沢の金属面など）の温度は通常は 0 ℃を下回ります。

また、太陽のあたっている物体は太陽光を吸収することで加熱され、温度が上昇します。これは物体の表面温度にも大きく影響し、場合によっては、すでに日光を受けなくなって数時間経過している物体にでも、かなりの影響が残ります。

図 2.1（P.20）の熱画像では、家の壁よりも雨樋の方が低温であるかのように見えますが、実際には両者の温度はほぼ同じです。ではなぜ、このような熱画像になるのでしょうか。

図 2.1：屋外測定における反射

ここで、雨樋の表面は亜鉛メッキされていて、放射率が非常に小さい（ε = 0.1）と仮定します。すると、雨樋が放射する遠赤外線のうち、雨樋自体から放射されているのは約 10%に過ぎず、残りの約 90%は周辺からの反射になります。晴れの日には、雨樋は上空で拡散された赤外線（約 -50～-60 ℃）を反射します。図 2.1 では、家の壁の温度を正確に測定するために、サーモグラフィ装置は、放射率（ε）= 0.95、反射温度 = -55 ℃に設定されています。雨樋は放射率が非常に低く、反射率が非常に高いため、熱画像内では、非常に低温の物体として示されます。熱画像内で両方の物体の温度を正確に表示するためには、後で解析ソフトウェア（testo IRSoft のバージョン 2.0 またはそれ以降）を使って、画像内の特定の領域（この場合は雨樋）の放射率を変更します。

- 測定者自身の体から放出される赤外線の影響についても、つねに注意する必要があります。
- 反射があるかどうかを確認するためには、測定の途中で測定位置（測定者の位置）を変えてみてください。測定物の温度分布は移動しませんが、反射は、視線の角度が変わるだけでも移動します。
- 非常に高温の物体や非常に低温の物体の近くでの測定は避けるか、物体からの放射を遮蔽してください。
- 測定物は、測定時だけでなく、測定の数時間前から直射日光にさらされないようにしてください。測定は、朝早くに実施してください。
- 可能ならば、屋外での測定は、天候が曇りのときに実施してください。

3. 天候

曇り

厚い雲に覆われた曇り空は、屋外でのサーモグラフィ装置を使用する温度測定に最適です。これは、雲が日光と上空で拡散された赤外線（P.19「放射」参照）を遮るためです。

降水（雨、雪）

雨や雪などが激しいときには、測定結果の精度が落ちます。水や氷や雪は放射率が高く、赤外線を通しません。また、雨などによって濡れた物体を測定すると、水分が蒸発するときに物体が冷却されるため、測定誤差が発生する可能性があります（P.16「測定対象物の表面」参照）。

晴れ
(P.19「放射」参照)

- 測定は、曇り空の日に実施するのが理想的です。
- 雲の状態は､測定の数時間前から確認してください。
- 雨や雪などの降水時には測定を避けてください。

4. 空気

湿度

測定場所の空気は、空気中での結露（霧）や測定物への結露、サーモグラフィ装置のレンズプロテクタやレンズへの結露が起きないよう、相対湿度は十分に低い値でなければなりません。レンズ（またはレンズプロテクタ）に水滴が付着すると、水滴を赤外線が透過できないためにサーモグラフィ装置はすべての赤外線を受光することができません。

霧（空気中での結露）の密度が非常に高い場合には、霧が放射経路を遮るため、赤外線放射の通過量が減り、測定結果に影響が出ます。

空気流

風や室内の空気流は、サーモグラフィ装置による温度測定に影響を与える場合があります。

物体表面近くの空気は、熱交換（対流）によって物体表面と同じ温度になります。風や空気流のある条件下では、こうした空気の層が、測定対象物の温度とまだ同化していない新しい空気層によって吹き飛ばされます。対流の結果、高温の測定対象物の熱は放

出され、低温の測定対象物は熱を吸収します。こうした熱の放出や吸収は、測定対象物の表面と空気の温度の間の調節が終わるまで続きます。こうした熱交換の影響は、測定対象物の表面温度と周辺温度の差が大きいほど大きくなります。

空気の汚染

埃、すす、煙などの空中浮遊物や蒸気は、放射率が高く、ほとんどは透過性がありません。これらの物体はみずから赤外線を放射するため、これがサーモグラフィ装置によって検知され、測定精度を低下させる場合があります。また、測定対象物からの赤外線は空中浮遊物に衝突して散乱したり吸収されたりするため、一部分しかサーモグラフィ装置に届きません。

- 濃い霧や水蒸気が立ちこめている場合は、決して測定を実施しないでください。
- 空気中の水分がサーモグラフィ装置や測定対象物に結露する場合には、測定を実施しないでください（P.17「表面の濡れ、着雪、霜」参照）。
- 測定中は、できるだけ風やその他の空気流を避けてください。
- 測定中は空気流の速度と方向を記録し、熱画像を解析する際に考慮に入れてください。
- 空気の汚染がひどい場合は、測定を実施しないでください（埃が舞い上がった直後など）。
- 空気中の浮遊物の影響を最小化するため、つねに測定距離はできるだけ短くして測定するようにしてください。

5. 光

光や照明は、サーモグラフィ測定にあまり影響しません。サーモグラフィ装置は遠赤外線で測定するので、暗闇の中でも測定を実施できます。ただし、光源の中には赤外線（熱）を放出するものがあり、近くにある物体の温度に影響します。したがって、例えば直射日光下や高温の電球の近くでは、測定を実施するべきではありません。LED やネオンランプなどの低温の光源は、エネルギーの大部分を赤外線ではなく可視光に変換するため、問題ありません。

2.2 放射率(ε)と反射温度の特定

測定対象物の表面の放射率を特定するには、例えば以下に挙げる方法が使えます。

- 材質の標準的な放射率（P.48「放射率表」参照）を用いる。
  注意：
  放射率表に記載されている値は、参考値です。実際の測定対象物の表面の放射率は、選択した参考値とは異なる場合があります。
- 接触式温度計(testo 905-T2 または testo 925 など)で測定した基準測定値を使って放射率を特定する（P.25「接触式温度計による方法」参照)。
- サーモグラフィ装置で測定した基準測定値を使って放射率を特定する（P.26「サーモグラフィ装置による方法」参照)。

基準測定値による放射率の特定

1. 接触式温度計による方法

最初に、接触式温度計（testo 905-T2 または testo 925 など）を使って測定対象物の表面温度を測定します。次に、サーモグラフィ装置で放射率を 1 に設定して、測定対象物体の表面温度を測定します。このとき、接触式温度計の測定値とサーモグラフィ装置の測定値の間に差が出ますが、これは放射率が高く設定されているためです。放射率設定を徐々に下げ、温度測定値を接触式温度計による測定値に一致させてください。一致したときに設定されている放射率が、測定対象物の表面の放射率になります。

2. サーモグラフィ装置による方法

はじめに、黒体テープ（放射率 ε=0.95 の表面を持つ粘着テープ）を測定対象物に貼り付けます。しばらく待った後で、サーモグラフィ装置に黒体テープの放射率を設定して、テープを貼り付けた部分の測定物の表面温度を測定します。この温度が、基準温度になります。次に、サーモグラフィ装置で同じ場所をテープなしで測定して、先ほど得られた基準温度と測定値が一致するまで、放射率の値を調節します。一致したときに設定されている放射率が、測定対象物の表面の放射率になります。

黒体テープの代わりに、以下を使うこともできます。

- 測定対象物に放射率の分かっているコーティングまたは塗装をする。
- 測定対象物に耐熱オイル（$\varepsilon \fallingdotseq 0.82$）を厚く塗る（0.13 mm 以上）。
- 測定対象物にすす（$\varepsilon \fallingdotseq 0.95$）を厚く塗る。

- **注意：**
  測定対象物の取扱説明書の記載事項には、つねに従ってください。
- 測定対象物にコーティングや黒体テープ貼付を行う場合、コーティングや黒体テープが対象物と同じ温度になるのを待ってからでなければ、正しい測定は実施できません。

反射温度の特定

測定に影響する可能性のある干渉要因をすべて取り除くと、反射温度は周辺温度に一致します。ここで、例えば testo 610 温湿度計を使って周辺温度を測定し、その値に基づいてサーモグラフィ装置に反射温度を入力します。
ただし、測定環境内に熱源が存在する場合は、正しい測定結果を得られるようにするため、反射温度を特定する必要があります。

(簡易) ランバート面を使った反射温度の測定

ランバート面とは、入射する電磁波をあらゆる方向に均等な強さで拡散する面のことです。
ランバート面の反射温度は、サーモグラフィ装置を使って測定できます。アルミホイルをつぶした後で開けば、この用途に適したランバート面として使用できます。ホイルは反射率が高く、つぶしてしわだらけになった表面構造は、ほぼ完璧な拡散反射をすることができます (P.32 図 2.3 のアルミホイルの正しい面を参照)。
反射温度を測定するためには、ランバート面を測定対象物の近くか、できれば測定対象物の表面上に配置します。ここで、サーモグラフィ装置の放射率を 1 に設定してランバート面の温度を測定します。この値をサーモグラフィ装置に反射温度として入力し、放射率を測定対象物の放射率に設定したうえで、測定対象物の温度を測定します。

2.3 サーモグラフィ装置による温度測定の誤差の発生源

以下に挙げる項目は、サーモグラフィ装置による温度測定の結果に悪影響を与える可能性があります。

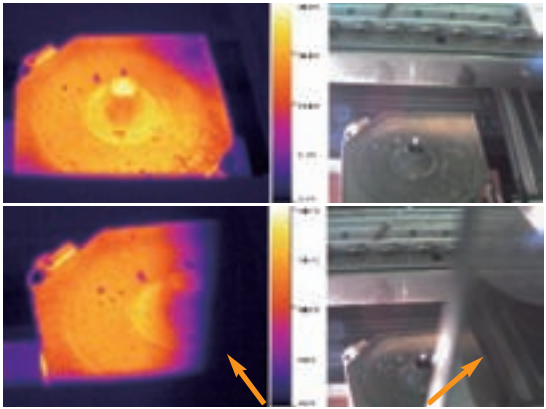
- 不適切な放射率の設定
  - ⇨ 適切な放射率を特定し、設定してください（P.25「基準測定値による放射率の特定」参照）。
- 不適切な反射温度の設定
  - ⇨ 反射温度を特定して設定してください（P.27「反射温度の特定」参照）。
- 不鮮明な（ピンぼけ）熱画像
  - ⇨ 熱画像のピントは、撮影時にきちんと合わせてください。撮影した画像のピントを後で修正することはできません。
- 測定距離が長すぎるまたは短すぎる
- 不適切なレンズによる測定
- 測定対象物に対して、サーモグラフィ装置の分解能が不十分
  - ⇨ 通常の写真撮影の場合と同様に、状況に応じて標準レンズと望遠レンズを使い分けてください。
  - ⇨ 測定距離はできるだけ短くしてください。
  - ⇨ 測定時には、サーモグラフィ装置の最短撮影距離に注意してください。
- 測定環境の問題（空気の汚染、対象物の遮蔽など）
- 外部熱源の影響（電球、太陽、ヒーターなど）
- 反射による熱画像の解釈の誤り
  - ⇨ 干渉要因のある場所での測定は避けてください。
  - ⇨ 干渉源は、できるだけ干渉力を無効にするか遮蔽してください。それができない場合は、熱画像を解析する際に、その影響を考慮に入れなければなりません。

- 周辺温度の急速な変化
  - ⇨ 低温環境から高温環境へ移動したときに、レンズに結露が発生する場合があります。
  - ⇨ サーモグラフィ装置は、できる限り、温度不均一補正機能を搭載しているものを使用してください。
- 測定対象物の材質や構造に関する知識不足による、熱画像の解釈の誤り
  - ⇨ 測定対象物の材質や構造は把握しておかなければなりません。
  - ⇨ 熱画像を解釈する際には、可能な限り、対象物の実物の画像（写真）も使用してください。

ガラスの測定

ガラスは人の目には透明に見えますが、赤外線は通しません。したがって、サーモグラフィ装置でガラスの表面温度を測定することはできますが、ガラスの向こう側にあるものの温度は測定できません（図 2.2)。ただしガラスは、日光など、波長の短い光は通します。このため、例えば窓ガラスを通して差し込む日光などによって、測定対象物が暖められる場合があります。

ガラスにはまた、反射性があります。ガラスをサーモグラフィ装置で測定するときには、鏡面反射現象が起きることに注意してください（P.31「鏡面反射」参照)。



測定対象物の手前に差し入れたガラス板

図 2.2：ガラスの測定

金属の測定

金属は遠赤外線に対して強い反射性があり、表面に光沢のあるものほど、その性質は強まります。金属の放射率は非常に低く、温度によって変化します。このため、こうした物体のサーモグラフィ装置による温度測定には、いくつかの問題があります。放射率の調節に加えて、反射温度を適切に設定することが非常に重要になります（P.27「反射温度の特定」参照）。また、鏡面反射に関する推奨事項も確認してください（P.31「鏡面反射」参照）。

金属の表面が塗装されている場合、問題は少なくなります。これは、一般的に塗料の放射率が高いためです。ただし、周辺からの赤外線反射については注意が必要です。

鏡面反射

多くの場合、目で見てはっきりと分かる鏡面反射は、表面の反射率が高く、放射率が低いことを意味します。しかし、鏡面反射の性質が強いからといって、必ずしも反射率が高いとは限りません。例えば、塗料は一般的に放射率の高い材料（$\varepsilon \fallingdotseq 0.95$）ですが、塗料によって塗装された面の熱画像には、周辺の赤外線の反射像が写ります（例：読書している人の姿など）。

逆に、例えば砂岩を材料とする壁面は、放射率が低い（$\varepsilon \fallingdotseq 0.67$）にもかかわらず、熱画像の中に周辺の物体の輪郭は写りません。表面が周辺の放射源の輪郭を明確に反射するかどうかを決める最も主要な要因は、放射率ではなく、表面の構造です。

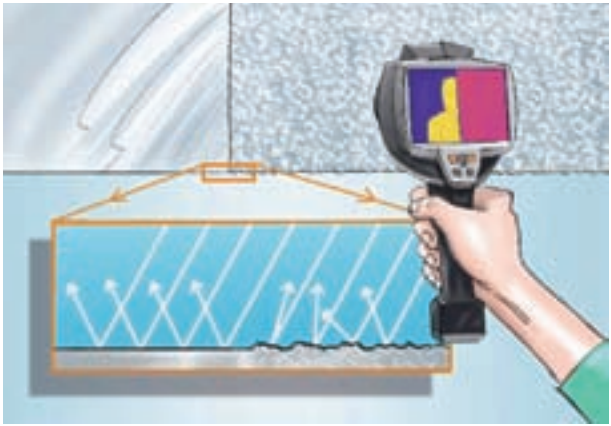


図 2.3：鏡面反射（正反射）と拡散反射

赤外線を含むあらゆる放射線は、つねに表面に当たったときと同じ角度で反射されます。すなわち、入射角と反射角はつねに等しいということです。図 2.3 の拡大図の左側に示した、平らでしわのないアルミホイルは、そのことを分かりやすく示しています。同図の熱画像には、測定者の姿が表面に当たってそのままの形で反射しているのが分かります（鏡面反射）。
もちろん、入射角＝反射角の原則は、無数のしわが寄ったアルミホイルの表面にぶつかる赤外線にも当てはまります（拡大図の右側）。しかし、平らなアルミホイルの表面とは違い、赤外線は、互いに異なる角度が付いた無数の小さな面に当たります。
そのため、赤外線は、ランバート面に当たった場合と同様に、さ

まざまな方向に向けて反射されます。こうした拡散反射の場合、赤外線の放射源の輪郭が反射像として写ることはありません。無数のしわが寄ったアルミホイルの面全体は、測定者自身と、測定者の背後の背景から放射される赤外線が混在したものを反射します。

- 鏡面反射する面でも、必ずしも反射率が高いとは限りません。
- 測定者自身の体から放出される赤外線の影響について、つねに注意してください。
- 鏡面反射が見られなくても、反射率の高い表面は存在します。
- なめらかな表面の温度分布に異常がある場合は、測定の角度や位置を変更することよって、反射によるものか、測定対象物によるものかを判別してください。

2.4 サーモグラフィ装置による温度測定に最適な条件

サーモグラフィ装置による温度測定では、周辺条件が安定していることが最も重要です。このため、測定中は、気候条件や測定対象物に加え、その他のあらゆる影響要因も一定であることが求められます。これによってはじめて、外乱要因を評価・記録し、のちの解析に役立てることが可能になります。
屋外での測定時には、気象条件が安定していて、曇り空であることが望まれます。曇り空は、測定対象物に直射日光と上空で拡散された赤外線の影響が及ぶのを防止します。また、測定対象物が測定時より前に日光にさらされていた場合は、日光から受けた熱が対象物に残っている可能性があることにも注意してください。

理想的な測定条件は、以下のとおりです。

- 気象条件が安定していること
- 測定前と測定中の天候が曇り空であること（屋外測定の場合）
- 測定前と測定中に直射日光を受けないこと
- 降水（雨、雪など）のないこと
- 測定対象物の表面が乾いていて、付着物もないこと（例：表面に落ち葉や木ぎれなどが残っていないこと）
- 風や空気の流れがないこと
- サーモグラフィ装置の周辺や視野の範囲に外乱要因がないこと
- 測定対象物表面の放射率が高く、その値が正確に分かっていること

建物の断熱性能を確認する目的でのサーモグラフィ測定は、建物内部と屋外との温度差が少なくとも 15 ℃以上あるときに実施することを推奨します。

2.5 完全な熱画像

熱画像を撮影するときには、以下の 2 つの点に特に注意する必要があります。

- 測定対象エリアを正しく選択すること
- 測定したい部分に熱画像のフォーカスを合わせる
  通常の写真（可視画像）と同様に、熱画像の場合も、ファイル保存後に対象エリアやフォーカスを変更することはできません。

理想的な熱画像を得るためにサーモグラフィ装置や解析ソフトウェア（testo IRSoft など）を使って実行できる対策は、以下のとおりです。

- 放射率と反射温度の設定を変更する。
  画像全体はもちろん、testo IRSoft 2.0 のような専門の解析ソフトウェアを使えば、ポイント毎や指定範囲のみの設定を変更することもできます。
- 適切なカラーパレットを選択する（例：アイアン、レインボーなど）。
  カラーパレットの種類を変えることによってコントラストを高め、熱画像を解釈しやすいものにすることができます。
- 温度スケールをマニュアル調節する。
  熱画像の温度グラデーションまたは色グラデーションを最適化するには、この方法を使います（図 2.4）

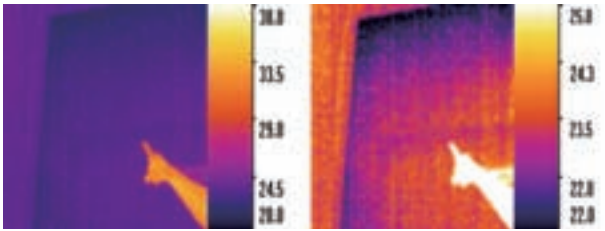


図 2.4：温度スケールの調節

熱画像の撮影時には、以下の点に配慮してください。

- すべての外乱要因を考慮に入れるか防止する、あるいは遮断する
- 測定対象物の表面に、外乱要因となる光源または熱源が当たらないようにする。
  可能ならば、周辺環境からの外乱として影響を与える物体やカバーを取り除く。
- 反射があるかどうかを確認するため、測定位置（対象物に対する向き）を変更してみる。測定物の温度分布は移動しませんが、反射による熱源の写りこみは、測定の角度が変わるだけでも移動します。
- 「測定対象物の最小直径」が実際の測定対象物よりも小さくなるレンズ及び距離を選ぶ
- 測定距離をできるだけ短くする
- 測定の目的に適した種類のレンズを使用する
- 詳細部の測定を実施するためには、サーモグラフィ装置を三脚等に固定する（推奨）

- 温度分布の特徴を正しく識別できるよう、測定対象物の設計について事前に理解しておく
- サーモグラフィ装置の内蔵デジタルカメラを使用して、熱画像ではない通常の写真（可視画像）も撮影しておき、後で解析するときに利用する
- 周辺の環境条件を測定して記録し、後で熱画像を解析する際に使用する

3 付 録

3.1 サーモグラフィ用語集

あ

アイソサーム

等温線とも呼び、同じ温度または指定した温度帯を結ぶことによって描かれます。
実際には、解析ソフトウェア（testo IRSoft など）を使うことで、熱画像内の指定温度帯に着色します。

温度分解能

サーモグラフィ装置によって識別可能な最小の温度差。この値が小さいほど、サーモグラフィ装置による温度測定の分解能がすぐれていることになります。

か

灰色体

自然界のほぼすべての物体は、「灰色体」です。灰色体は、黒体とは違って、入射赤外線のすべてを吸収することはありません。
灰色体は入射赤外線の一部を必ず反射し、種類によっては透過するものもあります。したがって、灰色体の放射率は、1 より小さい値になります。

華氏［°F］

主に北米で使われている温度の単位。

°F =（°C x 1.8）+ 32

20 °Cの華氏への換算例：(20 °C x 1.8）+ 32 = 68 °F

カラーパレット
サーモグラフィ装置の熱画像について選択できる表示色の組み合わせです（例：レインボー、アイアン、グレースケールなどがあります）。熱画像のコントラスト品質は、個々の測定タスクと使用するカラーパレットによって異なります。カラーパレットは、熱画像を保存した後で解析ソフトウェア（testo IRSoft など）を使い、設定しなおすこともできます。

吸収率（α）
物体に赤外線が入射すると、一部の赤外線放射エネルギーが物体に吸収されます。
このとき物体で吸収され熱に変わる赤外線放射エネルギーと、物体に入射したエネルギーの比を吸収率と呼びます。

空間分解能
サーモグラフィ装置で検出できる 1 画素の視野角で、角度（mrad）で表されます。
空間分解能と測定距離から 1 画素の視野の範囲(最小検知寸法)を求められます。
空間分解能は、サーモグラフィ装置の検出素子とレンズの性能によって決まります。従って、同じ検出素子であっても広角レンズを取り付けた場合と望遠レンズを取り付けた場合とでは空間分解能が変わります。

結露
空気中の水蒸気が固体表面で凝縮する（水となる）現象。
物体の表面温度が低く、そのため物体表面近くの空気が冷やされて、空気温度が露点（46 ページ参照）を下回ると、空気中の水分

が物体表面上に結露します。

ケルビン［K］（Kelvin［K］）
温度の単位です。
0 K は、絶対零度（-273.15 ℃）に相当します。異なる温度単位の間の関係は、以下のとおりになります。

273.15 K = 0 ℃ = 32 ℉
K = ℃ + 273.15.

20℃のケルビンへの換算例： 20 ℃ + 273.15 = 293.15 K.

検出素子
サーモグラフィ装置に使われている検出素子は、赤外線を受けて電気信号へと変換します。検出素子のサイズは、画素数で表します。

校正
計測器の読み取り値（実測値）と、基準計測器の読み取り値（公称値）を確定して比較する作業のことです。校正の結果は、計測器の読み取り値が許容範囲/公差範囲内にあるかどうかの判断材料になります。調節とは異なり、校正では、読み取り値の偏差を記録するだけで、基準値に一致させる作業は行いません。校正の実施頻度は、個々の測定タスクと要求事項によって変わります。

黒体
入射する赤外線エネルギーのすべてを吸収する物体です。吸収したエネルギーをそれ自身が放射する赤外線に変換し、すべてを放射します。黒体の放射率は、1 です。したがって、赤外線を反射したり透過することはありません。このような物体は、実際には存

在しません。
サーモグラフィ装置の校正用の装置を黒体と呼ぶこともありますが、その放射率は 1 をわずかに下回ります（ε > 0.95）。

さ

サーモグラフィ
赤外線放射エネルギーを検出し、見かけの温度に変換し、その分布を画像表示する方法または装置。

サーモグラフィ装置
サーモグラフィとも呼びます。
赤外線放射エネルギーを検出し、見かけの温度に変換し、その分布を画像表示する装置。

最高温度位置と最低温度位置
コールドスポット（略称：CS）やホットスポット（略称：HS）とも呼びます。
熱画像内で最も温度が高い場所をホットスポット（最高温度位置）と呼び、最も温度が低い場所をコールドスポット（最低温度位置）と呼びます。
testo875/881 などサーモグラフィ装置で「最高/最低温度表示」機能を使うと、ディスプレイ内の最高温度位置（HS）と最低温度位置（CS）を表示することができます。
また、この機能は testo IRSoft をはじめ、多くの解析ソフトウェアにも搭載されています。testo IRSoft では、熱画像内に任意の領域を指定して、その範囲内の最高/最低温度位置を表示させることもできます。

最小検知寸法
サーモグラフィ装置の 1 画素に相当する視野（mm)。

視野
サーモグラフィ装置で撮影可能な範囲を長さ（m）で示したもの。視野角と測定距離から求めることができます。

視野角
角度（° ）で表される水平視野角と垂直視野角を総称して視野角と呼びます。
視野角と測定距離からサーモグラフィ装置で測定できる視野の大きさを求められます。
視野角は、サーモグラフィ装置の検出素子とレンズの性能によって決まります。従って、同じ検出素子であっても広角レンズを取り付けた場合と望遠レンズを取り付けた場合とでは視野角が変わります。

赤外線放射
地球上にある全ての物体は、絶対零度（0 K = -273.15 ℃）以上の温度を持っており、必ず電磁波である赤外線放射エネルギーを放射しています。
赤外線は、可視光より長く 1mm より短い波長域(0.75 μm～1000 μm）ですが、サーモグラフィ装置では大気中での減衰が少ない波長域（短波長または長波長側の大気の窓）を検出します。実際には、testo875/881 と同様に短波長側の大気の窓にあたる赤外線（8 μm～14 μm）を検出するサーモグラフィ装置が大半を占めます。

摂氏［℃］（Celsius［℃］）
温度の単位です。摂氏 0 度（0 ℃）は、常圧下で水が氷結する温度です。摂氏温度のもう 1 つの定点は、水の沸点である 100 ℃です。
℃ =（℉ -32）/1.8 または ℃ = K – 273.15

絶対零度
絶対零度は、-273.15 ℃（0 K = -459.69 ℉）に相当します。絶対零度では、物体は赤外線をまったく放射しません。

相対湿度（%RH：Relative Humidity）
空気中の水蒸気の飽和率をパーセンテージで示した値です。例えば、33%RH は、温度と気圧が同じ条件であるときに空気が最大限含むことのできる水蒸気と比較して、その 3 分の 1 に相当する水蒸気を含んでいることを意味します。相対湿度が 100%を超えると、空気中の水蒸気が完全に飽和して、空気中にそれ以上の水蒸気を取り込めなくなるため、結露が発生します。これは、空気中の水蒸気が液体に変化することを意味します。空気は、温度が高いほど、結露を発生させることなく、より多くの水蒸気を吸収することができます。このため、結露はつねに低温の物体の表面から始まります。

測定対象物の最小直径
サーモグラフィ装置によって温度を正確に捉えることのできる最小の物体サイズを指します。
この最小直径は、最小検知寸法の一辺を 3 倍することで求められます。

た

対流
流体を媒体として伝熱する方法を対流と呼びます。
温度差がある流体（液体や気体）同士、あるいは流体と固体の間で生じる伝熱です。

伝導
接触している物体間で分子の振動が伝わることによって、伝熱する方法を伝導と呼びます。
温度差がある固体、液体、気体の全てにおいて生じる伝熱です。

透過率 （τ）
物体に赤外線が入射すると、一部の赤外線放射エネルギーが物体を透過します。
このとき物体で吸収されずに透過していく赤外線放射エネルギーと、物体に入射したエネルギーの比を透過率と呼びます。
この透過率は、物体の材質や厚みによって変化します。

な

2 点温度表示
2 点温度表示では、サーモグラフィ装置のディスプレイ内で 2 つのクロスヘア（十字）を使用し、それぞれの温度を表示します。

熱画像
サーモグラフィ装置によって検出した赤外線放射エネルギーを見かけの温度分布としてコントラストやカラーパターンを使って表示した画像のこと。

は

反射温度補正（RTC：Reflected Temperature Compensation）
実際の物体は、熱放射の一部を反射します。放射率の低い物体を測定対象とする場合には、この反射温度を考慮し、その影響を取り除く必要があります。具体的には、サーモグラフィ装置にマニュアル操作で反射温度の値を設定したり、ソフトウェアを使って設定したりします。
反射温度は、ほとんどの場合、周辺温度に一致します。外乱要因からの赤外線が測定対象面に反射する場合は、反射温度を特定する必要があります（黒球温度計やランバート面を使います）。放射率が非常に高い物体の場合、反射温度の影響はほとんどありません。

反射率（ρ）
物体に赤外線が入射すると、一部の赤外線放射エネルギーが物体表面出で反射されます。
このとき物体表面で反射した赤外線放射エネルギーと、物体に入射したエネルギーの比を反射率と呼びます。

フレームレート
表示する熱画像の更新頻度を Hz で表した値です（9Hz、33Hz、60 Hz など）。フレームレートが 9Hz の場合、サーモグラフィ装置はディスプレイ内の熱画像を 1 秒間に 9 回更新します。

放射率（ε）
ある温度の物体が放射する赤外線放射エネルギーと，その物体と同一温度である黒体の赤外線放射エネルギーの比を放射率と呼びます。

この放射率は、表面の材質や構造によって変化し、一部は温度によっても変化します。

ら

ランバード（ランベルト）面

均等拡散面とも呼びます。反射率 ρ=1 で、入射する赤外線を均等に拡散反射させる面のことです。
このランベルト面と放射温度計を使って、測定面で反射する周囲熱源の影響（反射温度）を測定することができます。

レンズ

サーモグラフィ装置に接続するレンズを交換することで、測定する範囲（画像の大きさ）や画像の細かさ（1 画素の大きさ）を変えることができます。
testo875/881 の標準レンズ（32°）などの広角レンズを使用すると、広い範囲を測定することができます。
testo875/881 の望遠レンズ(9°)などの望遠レンズを使用すると、離れた場所から小さな対象物を測定したり、より細かい画像を取得することができます。

露点

空気は水蒸気を含むことができます。温度の高い空気は多くの水蒸気をふくむことができ、温度の低い空気は少しの水蒸気しかふくむことができません。
水蒸気を含む空気（湿潤空気）の温度を下げていくとある温度で空気中の水蒸気が飽和状態となり、空気中の水蒸気が結露しはじめます。この時の温度が露点です。

MEMO

3.2 放射率表

以下の表は、赤外線測定時の放射率の設定の目安として使用できます。表には、一般的な材質の放射率 ε を列記しています。放射率は温度と表面の特性によって変化するため、ここに示した値はあくまでも温度分布または温度差の測定のための目安としてお使いください。正確な温度を測定するためには、物体の正確な放射率を特定する必要があります。

材質（温度）	放射率
アルミニウム：圧延研磨（170 ℃）	0.04
アルミニウム：未酸化（25 ℃）	0.02
アルミニウム：未酸化（100 ℃）	0.03
アルミニウム：酸化が進行（93 ℃）	0.20
アルミニウム：研磨面（100 ℃）	0.09
木綿（20 ℃）	0.77
コンクリート（25 ℃）	0.93
鉛：粗い面（40 ℃）	0.43
鉛：酸化（40 ℃）	0.43
鉛：グレー酸化（40 ℃）	0.28
クロム（40 ℃）	0.08
クロム：研磨面（150 ℃）	0.06
氷：平滑面（0 ℃）	0.97
鉄：エメリー研磨（20 ℃）	0.24
鉄：鋳鉄面（100 ℃）	0.80
鉄：圧延面（20 ℃）	0.77
石膏（20 ℃）	0.90
ガラス（90 ℃）	0.94
花崗岩（20 ℃）	0.45

材質（温度）	放射率
ゴム：硬質（23 ℃）	0.94
ゴム：軟質（23 ℃）	0.89
鋳鉄：酸化（200 ℃）	0.64
木材（70 ℃）	0.94
コルク（20 ℃）	0.70
ラジエータ：黒色酸化皮膜（50 ℃）	0.98
銅：軽度の変色（20 ℃）	0.04
銅：酸化（130 ℃）	0.76
銅：研磨（40 ℃）	0.03
銅：圧延（40 ℃）	0.64
プラスチック： PE、PP、PVC（20 ℃）	0.94
塗料：アルミホイル上の青（40 ℃）	0.78
塗料：黒、つや消し（80 ℃）	0.97
塗料：アルミホイル上の黄色､2 度塗り(40 ℃）	0.79
塗料：白（90 ℃）	0.95
大理石：白（40 ℃）	0.95
れんが（40 ℃）	0.93
真鍮：酸化（200 ℃）	0.61
油性塗料：あらゆる色（90 ℃）	0.92～0.96
紙（20 ℃）	0.97
磁器（20 ℃）	0.92
砂岩（40 ℃）	0.67
鋼鉄：熱処理表面（200 ℃）	0.52
鋼鉄：酸化（200 ℃）	0.79
鋼鉄：冷間圧延（93 ℃）	0.75～0.85
粘土：焼き込み（70 ℃）	0.91
変圧器塗料（70 ℃）	0.94
レンガ、モルタル、しっくい（20 ℃）	0.93
亜鉛：酸化	0.1

3.3 テストーからのご案内

サーモグラフィ装置の校正

お手持ちのサーモグラフィ装置は、定期的に校正することを推奨します。校正の実施頻度は、測定の内容と条件によって変わります。

サーモグラフィ装置の校正に関する詳細情報は、www.testo.comから入手することができます。

株式会社テストー

■本社営業部／技術部サービスセンター

〒222-0033 横浜市港北区新横浜 2-2-15 パレアナビル 7F
TEL. 045-476-2288　FAX. 045-476-2277

■大阪営業所

〒530-0055 大阪市北区野崎町 7-8 梅田パークビル 9F
TEL. 06-6314-3180　FAX. 06-6314-3187

ご存知ですか？

ガラガラヘビには熱放射を検知する能力があり、暗闇の中でも獲物や敵の居場所を瞬時に知ることができます。
ガラガラヘビは、クサリヘビ科マムシ亜科に属し、わずか 0.0003 ℃の温度差も素早く察知することができます。
温度を検知するのは、非常に敏感な「ピット器官」と呼ばれる部分です。
この感覚器があるおかげで、ガラガラヘビは、サーモグラフィによく似た画像を見ることができます。

株式会社 テストー

本 社 営 業 部：〒222-0033 横浜市港北区新横浜 2-2-15　パレアナビル 7F
TEL. 045-476-2288　FAX. 045-476-2277

大 阪 営 業 所：〒530-0055 大阪市北区野崎町 7-8　梅田パークビル 9F
TEL. 06-6314-3180　FAX. 06-6314-3187

ホームページ：http://www.testo.jp
e-mail：info@testo.co.jp

(2009.12)